

## بررسی تأثیر سوخت فلزی نانو آلومینیم بر عملکرد پیشران‌های موشکی

سعید زینالی هریس<sup>\*</sup>، احمد اخوت، میر مجتبی بکتاش

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

### چکیده

خصوصیات نانو پودرهای مختلف آلومینیم، مشابه میکروذرات آلومینیمی دارای طرفداران و منتقدان بسیاری جهت استفاده به عنوان سوخت‌های جامد موشک می‌باشند. در این بررسی، این خصوصیات و تأثیر آن‌ها بر مشخصات عملکردی و فرمولبندی احتراقی سوخت‌های آلومینیمی موشک توسط روش‌های BET<sup>۱</sup> و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM<sup>۲</sup> به منظور تعیین میزان کارایی آن‌ها به عنوان سوخت جامد مورد بررسی قرار گرفته است. این ذرات که به عنوان مواد تشکیل‌دهنده سوخت موشک مورد استفاده قرار می‌گیرند بر پایه پرکلرات آمونیوم (AP)<sup>۳</sup> به عنوان اکسیدکننده و HTPB<sup>۴</sup> به عنوان پوشش می‌باشند. سه دسته سوخت که شامل ترکیبات مختلفی می‌باشند به منظور بررسی اثرات جایگزینی نانو ذرات آلومینیم به جای میکرو ذرات آلومینیم، تأثیرات توزیع غیریکنواخت آلومینیم و بررسی اثرات کهنگی سوخت بر روی سرعت اشتعال پایدار، مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی این سوخت‌ها مشخص شد که با کاهش اندازه ذرات آلومینیم (استفاده از ذرات درمقیاس نانو به جای میکروذرات) و نیز استفاده از ذرات نوتر، در مقایسه با ذرات با زمان نگهداری طولانی تر، سرعت اشتعال پایدار افزایش می‌یابد. با جایگزینی جزئی نانو ذرات (Al-01a) (۰/۱۵ میکرومتر) به جای ۲۰٪ از ذرات (Al-06) (فلس‌های آلومینیم ۵۰ میکرومتری) سرعت اشتعال ۴۰٪ افزایش یافت. در حالی که با جایگزینی (Al-03d) (۲/۵ میکرومتر) با مقدار مشابهی از (Al-06)، سرعت اشتعال فقط ۲۸٪ افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: سوخت‌های جامد موشک، سطح مخصوص، نانو ذرات آلومینیم، سرعت اشتعال پایدار، میکروسکوپ

الکترونی

### ۱- مقدمه

(AP)، یک فیلر فلزی (که می‌تواند سوخت خوبی باشد، مثل پودر آلومینیم) و یک پوشش آلی (عملاً یک ماتریکس پلیمری مثل HTPB) می‌باشند [۱]. اخیراً توجه ویژه‌ای به سوخت‌های جامد شامل نانو ذرات آلومینیم، صورت گرفته است. این توجه به خاطر انرژی بسیار زیاد تولید شده در اثر احتراق سوخت جامد حاوی نانو ذرات آلومینیم همراه با اکسیدکننده و همچنین نتایج بسیار عالی

سوخت‌های جامد موشک‌ها و راکت‌هایی که برای کاربردهای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً چندسازه‌ای از یک جزء اصلی اکسیدکننده (مانند یک نمک غیر آلی مثل پرکلرات آمونیوم

1. Brunauer – Emmet – Teller
2. Scanning Electron Microscopy
3. Ammonium Perchlorate
4. Hydroxyl-Terminated PolyButadiene

با دمای بسیار پایین، امکان تقریباً نامحدود برای انتخاب اجزای سوخت، مواد منتشره محدود، دانسیته و ملاحظات زیست محیطی می‌باشد. با توجه به این ویژگی‌ها، هزینه‌ای که باید پرداخت شود شامل هزینه سرمایش ثابت و هزینه طراحی خاص برای کنترل احتراق به صورت حرکت از سوختن آرام به احتراق لایه مرزی هیبریدی می‌باشد. این کار با ساختن افزودنی‌های نانو ذرات جامد حاوی آلومینیم علاوه بر اجزای ماکروسکوپی سوخت به جای استفاده از مخلوط‌های چندسازه‌ای مرسوم انجام می‌گیرد. همچنین این اجزاء باید پوشش داده شوند و حفاظ و نگهدارنده داشته باشند. طرح اجمالی موتور راکت سوخت جامد CSP در شکل (۱) نشان داده شده است. مجموعه نتایج تجربی و نظری حاصل از مطالعات، تاییدی بر پتانسیل نانو ذرات آلومینیم به عنوان سوخت جامد می‌باشد.

## ۲- بررسی ذرات آلومینیم

به منظور انجام مقایسه، نانو ذرات و میکرو ذرات آلومینیم مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. خلاصه‌ای از مشخصات این ذرات در جدول (۱) آورده شده است. میکرو و نانو ذرات آلومینیم عمدتاً توسط با یکی از سه روش زیر تولید می‌شوند [۱]:

- انفجار الکتریکی سیم فلزی (EEW<sup>۴</sup>): این روش بهترین روش تولید ذرات آلومینیم با سطح زیاد می‌باشد. با این روش، ذرات آلومینیم کروی شکل متراکمی، با قطر میانگین (۱۵۰-۱۰۰) nm و سطح ویژه  $1 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (۲۰-۱۰) تولید می‌شوند [۸].

- آسیاب و خرد کردن مکانیکی (MM<sup>۵</sup>): ذرات تولیدی با این روش به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات اولیه، فشار عملیاتی، سرعت در نازل‌ها و سرعت گردش ذرات بستگی دارند [۸].

- کندانس پلاسما (PC<sup>۶</sup>)

به عنوان مثال، (Al-01a) به روش اول و (Al-03d) و (Al-06) به روش دوم تولید شده‌اند. (Al-05) (کره ای به قطر ۳۰ میکرومتر)، ذره آلومینیم استاندارد است که امروزه به عنوان سوخت‌های هوایی در اروپای غربی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵].

آن‌ها در افزایش سرعت اشتعال پایدار، کاهش مدت اشتعال و دمای اشتعال و همچنین کاهش تجمع ذرات فلزی در اطراف سطح اشتعال و نیز کاهش اندازه و به تبع آن جرم موشک می‌باشد. مطالعات انجام گرفته نشان‌دهنده آن است که واکنش‌پذیری فلزات از جمله آلومینیم با کاهش اندازه ذرات به طور غیرخطی افزایش می‌یابد [۳-۲]. از سوی دیگر، نتایج بررسی‌ها بیانگر آن است که این مزیت همراه با بالارفتن هزینه، کاهش ایمنی، خصوصیات مکانیکی بد سوخت، انرژی بسیار زیاد آزاد شده توسط نانو ذرات آلومینیم، محدودیت‌های استفاده از ترکیبات نانو ذرات آلومینیم و صدمه زدن به اجزای مختلف پیشرانه می‌باشد.

عموماً از دو روش برای افزایش سرعت اشتعال پایدار، کاهش مدت اشتعال و دمای اشتعال سوخت استفاده می‌شود. در روش اول میکرو ذرات آلومینیم را با لایه نازکی از نیکل پوشش می‌دهند [۴] و در روش دوم به جای میکرو ذرات از نانو ذرات آلومینیم به عنوان سوخت استفاده می‌شود [۵]. پوشاندن میکرو ذرات آلومینیم با لایه نازکی از نیکل، موجب جلوگیری از تجمع ذرات فلزی و همچنین افزایش بازدهی سوخت‌های آلومینیمی می‌شود [۴]. نانو ذرات آلومینیم نیز معمولاً با یک لایه اکسیدی به منظور جلوگیری از اکسایش سطحی، اشتعال ناخواسته، اصطکاک، ضربه و افزایش دما پوشش داده می‌شوند.

هیدن و همکاران [۶] آزمایش‌هایی با نانو ذرات اکسید مس پوشش داده با هگزا متیلن سیلیکون اکساید<sup>۱</sup> در یک راکتور پلاسما به صورت بستر متحرک<sup>۲</sup> انجام دادند که اجازه پوشش دار شدن ذرات به صورت نانولایه را می‌داد و به نتایج جالب توجهی دست یافتند به طوری که خاصیت آب دوستی پودرهای اکسید مس خالص به خاصیت آب گریزی تغییر یافت. هدف نهایی از این عمل استفاده از توانایی نانو ذرات پوشش داده شده به عنوان سوخت‌های جامد پیشرانه یا مواد محرکه در مقایسه با سوخت‌های جامد دارای خواص معمولی می‌باشد [۶].

در یک مورد دیگر، راجر [۷] با معرفی موادی که برای باقی ماندن در حالت جامد نیاز به سرد شدن دارند، افزودنی‌های جامد با دمای بسیار پایین CSP<sup>۳</sup> را در مقایسه با سوخت‌های جامد متداول و پیشرانهای مایع با عملکرد عالی، بررسی کرد. مزیت این سوخت‌های

4. Electric Explosion of Metallic Wires  
5. Mechanical Milling  
6. Circulation Rate  
7. Plasma Condensation

1. Hexamethylen Disiloxane  
2. Fluidized Bed  
3. Cryogenic Solid Propellents

نحوه توزیع پرکلرات آمونیوم در تمام سوخت‌های دسته اول و دوم، غیر یکنواخت و به صورت زیر می‌باشد [۵]:

۸۰٪ ذرات درشت در محدوده (۱۶۰-۱۴۰) میکرومتر و ۲۰٪ ذرات ریز در محدود (۷۰-۸۰) میکرومتر.

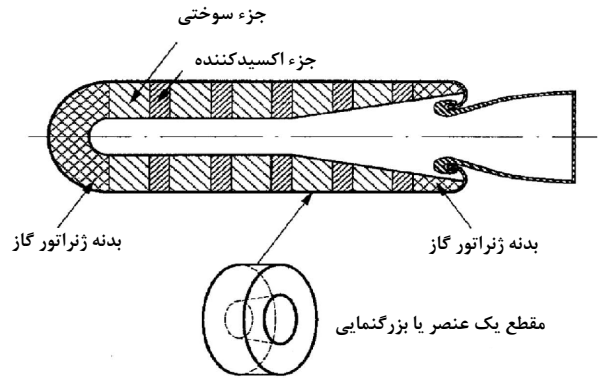
سوخت‌های دسته اول به منظور مقایسه اثرات جایگزینی نانو ذرات آلومینیم با مقدار مشابهی از میکرو ذرات آلومینیم مورد بررسی قرار گرفته اند. دسته اول شامل چهار ترکیب تک حالت می‌باشد. دو ترکیب (P-01a) و (P-06) به ترتیب شامل ۱۰۰٪ ذرات بسیار ریز با قطر اسمی ۰/۱۵ میکرومتر و ۱۰۰٪ میکرو ذرات آلومینیم (۵۰ میکرومتر) می‌باشند. دو سوخت دیگر سری اول (P-03d) و (P-05) نیز به ترتیب ذراتی با قطر اسمی ۲/۵ و ۳۰ میکرومتر می‌باشند [۵]. مشخصات سوخت‌های دسته دوم در جدول (۳) بیان شده است.

جدول ۲- سوخت‌های دسته اول [۵]

اندازه AP: (۱۵۰±۱۰ μm) + (۷۵±۵ μm) ۲۰٪ پوشش: (HTPB + DOA + IPDI) ۱۷٪			
چگالی (g.cm <sup>-2</sup> )	قطر اسمی ذرات آلومینیم (μm)	نوع ذرات آلومینیم	نوع سوخت
۱/۶۷۲	۰/۱۵	(Al-01a)	(P-01a)
۱/۵۵۶	۲/۵	(Al-03d)	(P-03d)
۱/۵۱۷	۳۰	(Al-05)	(P-05)
۱/۵۸۸	۵۰	(Al-06)	(P-06)

سوخت‌های دسته دوم به منظور بررسی اثرات توزیع غیر یکنواخت آلومینیم دو حالت، شامل ۸۰٪ ذرات درشت با سایز ۵۰ میکرومتر و ۲۰٪ نانو ذرات) بر طبق مقادیر پیش‌بینی شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مشخصات دسته سوم سوخت‌های مورد بررسی شامل نوع سوخت، نوع ذرات آلومینیم، اندازه ذرات و سال تولید در جدول (۴) ارائه شده است. سه سوخت دسته سوم به منظور بررسی اثرات کهنگی (سال تولید)، بر روی سرعت اشتعال مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



شکل ۱- موتور راکت با ذرات سوخت جامد CSP [۷]

جدول ۱- خلاصه و مشخصات ذرات مورد بررسی [۱۵]

سال تولید	نوع ذرات آلومینیم	منبع و روش تولید/شکل	سایز ذرات	
			قطر اسمی ذره (میکرومتر)	سطح مخصوص (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )
۲۰۰۲	(Al-01a)	روسیه - EEW - فاقد روکش	۰/۱۵	۱۵/۳
-	(Al-03d)	روسیه - خرد کردن نیوماتیکی - فاقد روکش	۲/۵	۰/۷
-	(Al-05)	ایتالیا - خرد کردن مکانیکی - کروی	۳۰	۰/۱
-	(Al-06)	ایتالیا - خرد کردن مکانیکی-فلسی	۵۰	<۰/۱

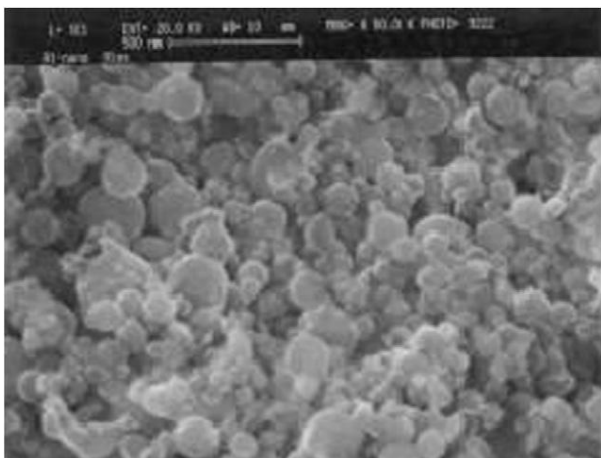
### ۳- فرمولبندی سوخت‌های جامد

به منظور مقایسه بین نانو ذرات و میکرو ذرات آلومینیم در کاهش میزان تجمع ذرات فلزی در اطراف سطح اشتعال و بهسوزی آنها، سوخت‌هایی با ترکیب‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

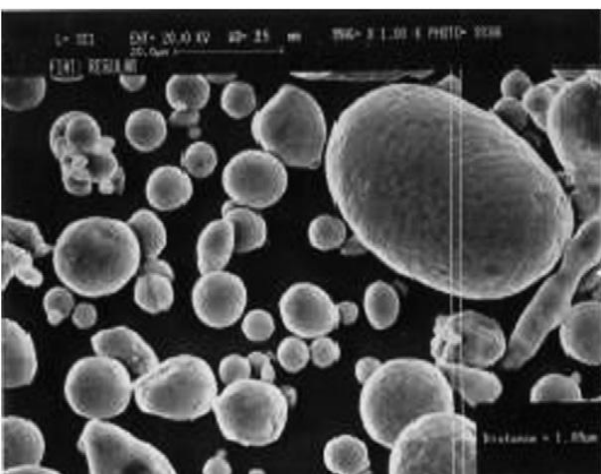
فرمولبندی پایه به صورت (AP) ۶۸٪، (HTPB) ۱۷٪ و (Al) ۱۵٪ در نظر گرفته شد. سه دسته سوخت متفاوت که مجموعاً شامل ۹ ترکیب می‌باشند مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در جدول (۲) سوخت‌های دسته اول ارائه شده اند.

1. Iso Phorone – Di Isocyanate
2. Di Octil Adiapate

که نمونه‌های (AI-05) و (AI-03d) به صورت ذرات بسیار ریز کروی پخش شده می‌باشند [۵].



شکل ۲- میکروگراف نمونه (AI-01a) با بزرگنمایی ۵۰۰۰۰ برابر



شکل ۳- میکروگراف نمونه (AI-05) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر

#### ۲-۴ اندازه‌گیری سطح مخصوص

روش BET قادر به اندازه‌گیری سطح مخصوص ذرات ریز کوچکتر از ۳۰ میکرومتر می‌باشد و برای ذرات بزرگتر از (AI-06) (۵۰ میکرومتر) کارایی ندارد [۹]. اندازه‌گیری سطح مخصوص ذرات با جذب سطحی تک‌دای نیتروژن و با اندازه‌گیری‌های حجمی تعادلی در دمای نقطه جوش نیتروژن مایع (۷۷ K) صورت گرفته است. نمونه‌ها در دمای ۱۰۰°C و به مدت چهار ساعت در فشار مطلق کمتر از  $10^{-3}$  Torr قرار گرفته و همه اندازه‌گیری‌ها بوسیله دستگاه کاملاً خودکار ASAP 2010-Micromeritics انجام و منجر به تعیین

#### جدول ۳- سوخت‌های دسته دوم [۵]

اندازه AP: $(150 \pm 10 \mu\text{m}) + 80\% + (75 \pm 5 \mu\text{m}) 20\%$			
پوشش: (IPDI+DOA+HTPB) 17%			
نوع سوخت	نوع ذرات آلومینیم	ذرات آلومینیم (μm)	چگالی (g.cm <sup>-2</sup> )
(P-07-B01a)	۸۰٪ نوع (AI-06)	۵۰	۱/۶۳
	۲۰٪ نوع (AI-01a)	۰/۱۵	
(P-07-B03d)	۸۰٪ نوع (AI-06)	۵۰	۱/۵۷
	۲۰٪ نوع (AI-03d)	۲/۵	

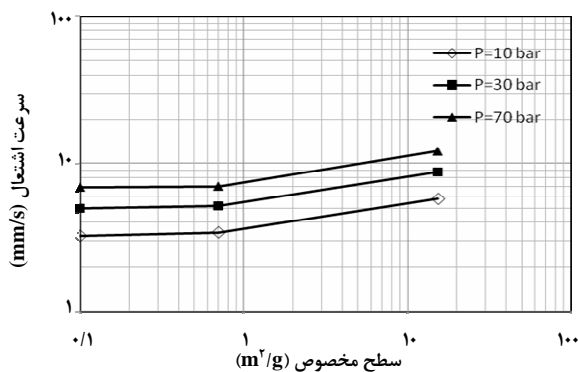
#### جدول ۴- سوخت‌های دسته سوم [۱]

نوع سوخت	نوع ذرات آلومینیم	ذرات آلومینیم (μm)	سال تولید
(P-02 a)	AI-02 a	۰/۱۷	۲۰۰۳
(P-02 b)	AI-02 b	۰/۱۷	۲۰۰۲
(P-02 c)	AI-02 c	۰/۱۷	۱۹۹۹

#### ۴- خصوصیات ذرات آلومینیم

##### ۴-۱ آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

میکروگراف‌های به دست آمده از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM در حقیقت تصویر الکترونی نمونه ذرات آلومینیم است که با استفاده از بزرگنمایی، شکل، خطوط سطحی و حجم توده‌ای نمونه‌ها قابل رویت است. در بزرگنمایی‌های بالا (۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ برابر) می‌توان توده‌های متشکل از ذراتی با ابعاد ۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر را مشاهده کرد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود ذرات AI-01a در مقیاس ۵۰۰۰۰ برابر، انواع مختلفی از تجمع غیر منظم از خود نشان دادند که متشکل از ذراتی با ابعاد ۵۰ تا ۲۵۰ نانومتر بوده و ذرات ریز تری با ابعاد حدود ۲۰ نانومتر به صورت پراکنده در میان آن‌ها قرار گرفته‌اند. در شکل‌های (۳) و (۴) نیز دیده می‌شود



شکل ۵- تغییرات سرعت اشتعال بر حسب سطح مخصوص در فشارهای مختلف برای (Al-01a) سطح مخصوص = (۱۵/۳ m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>), (Al-03d) (۰/۷۳), (Al-05) (۰/۱)

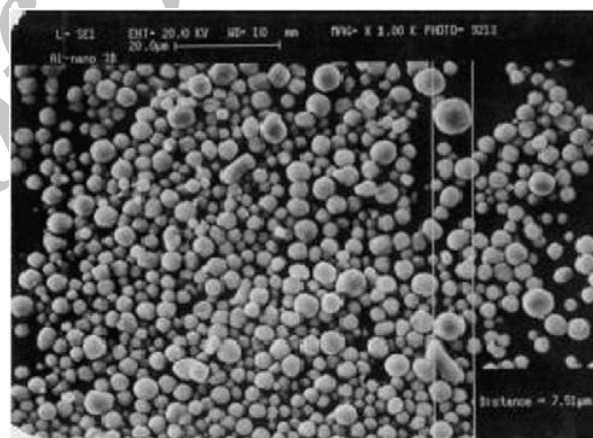
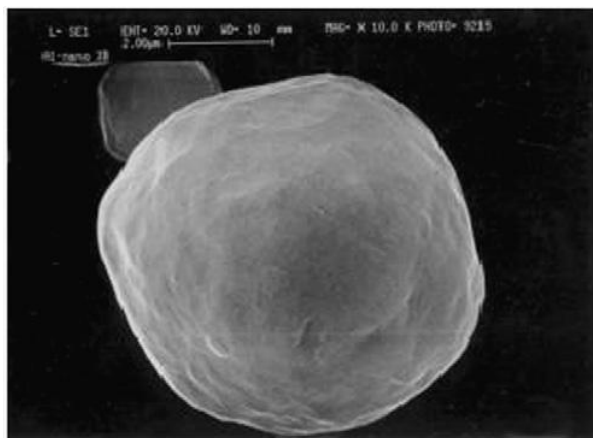
با توجه به اینکه احتراق فرایندی سطحی است این طور به نظر می‌رسد که سطح مخصوص پارامتری، مهم و مرتبط به سرعت اشتعال باشد. به همین منظور نمودار تغییرات سرعت اشتعال بر حسب سطح مخصوص در فشارهای مختلف برای سه ترکیب (Al-01a)، (Al-03d) و (Al-05) در شکل (۵) رسم و نحوه این تغییرات مورد بررسی قرار گرفته است. نکته جالب توجهی که در شکل (۵) دیده می‌شود این است که تغییرات سرعت اشتعال با سطح مخصوص در فشارهای مختلف به صورت خطی نیست. در حقیقت این تغییر شیب‌ها بیانگر تغییر رژیم احتراق در اثر تغییر اندازه ذرات از میکرو ذرات به نانو ذرات است.

#### ۵- تحلیل و بررسی احتراق سوخت‌های مورد بررسی

نمونه‌های سوخت مورد بررسی (۳۰×۴/۵×۴/۵ mm<sup>3</sup>)، به منظور اندازه‌گیری سرعت اشتعال پایدار در بمب NFWB سوزانده شدند. اشتعال بوسیله سیم (نیکل - کرم) بسیار داغ صورت گرفت. شمای از سیستم احتراقی در شکل (۶) نشان داده شده است. فشار در طول مدت احتراق ثابت نگه داشته شد. در محدوده فشاری ۱ تا ۷۰ بار، با ضبط تصاویر توسط دوربین‌های با سرعت بالا و استفاده از روش پردازش خودکار تصاویر، سرعت اشتعال پایدار نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج، سرعت اشتعال برای هر نمونه چند بار مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه ارائه شده، متوسط نتایج حاصل از حداقل سه مرتبه تکرار آزمایش است [۹ و ۱۰].

1. Nitrogen-Flushed Window Bomb

مقدار نهایی سطح مخصوص در واحد m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> گردیده است [۱]. نتایج در جدول (۵) به منظور مقایسه سطح مخصوص ذرات آلومینیم با قطر اسمی آن‌ها آورده شده است.



شکل ۴- میکروگراف‌های نمونه Al-03d (سمت چپ با بزرگنمایی ۱۰۰۰ و سمت راست با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر)

جدول ۵- مقایسه سطح مخصوص به کمک روش BET و قطر میانگین ذرات آلومینیم با قطر اسمی آن‌ها [۱]

سطح مخصوص (m <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> )	قطر اسمی ذرات آلومینیم (μm)	نوع ذرات آلومینیم
۱۵/۳±۰/۱۵	۰/۱۵	(Al-01a)
۰/۷۳±۰/۰۱	۲/۵	(Al-03d)
۱۷/۵±۰/۰۳	۰/۱۷	(Al-02 a)
۱۴/۴±۰/۰۷	۰/۱۷	(Al-02 b)
۱۲/۶±۰/۰۱	۰/۱۷	(Al-02 c)
۰/۱±۰/۰۱	۳۰	(Al-05)

همه فشارهای مورد بررسی، سرعت اشتعال بیشتری از خود نشان داد. با جایگزینی جزئی نانو ذرات (AI-01a) (۰/۱۵ میکرومتر) به جای ۲۰٪ از ذرات (AI-06) (فلس‌های آلومینیم ۵۰ میکرومتری) سرعت اشتعال ۴۰٪ افزایش یافت. در حالی که با توجه به شکل (۷) با جایگزینی (AI-03d) (۲/۵ میکرومتر) با مقدار مشابهی از (AI-06)، سرعت اشتعال فقط ۲۸٪ افزایش یافته است، از بررسی سرعت اشتعال سوخت‌های دسته اول و دوم می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- با جایگزینی نانو ذرات با میکرو ذرات سرعت اشتعال به نحو چشمگیری افزایش می‌یابد.

۲- با توجه به شکل‌های (۵) و (۷) درمی‌یابیم که افزایش سطح ویژه نانوذرات آلومینیم باعث افزایش سرعت اشتعال پایدار می‌شود.

۳- علت افزایش سرعت احتراق، افزایش سطح ویژه و در نتیجه واکنش پذیری ذرات آلومینیم است که باعث افزایش فیدبک حرارتی و در نهایت سرعت سوختن پایدار شده است.

۴- در سوخت‌هایی با فرمولبندی دوحالتی آلومینیم (دسته دوم)، جایگزینی نانو ذرات آلومینیم با میکرو ذرات آلومینیم باعث افزایش تدریجی سرعت اشتعال می‌گردد.

۵- در سوخت‌هایی با فرمولبندی تک حالتی آلومینیم (دسته اول)، این جایگزینی سرعت اشتعال را به نحو چشم‌گیری افزایش می‌دهد.

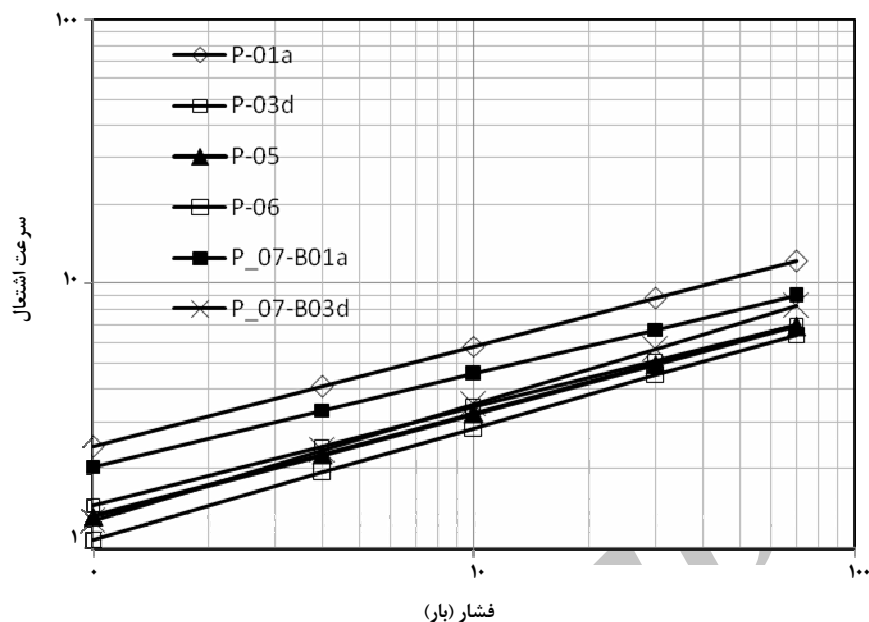


شکل ۶- تصویر محفظه احتراق (بمب NFWB) شامل مخزن، نگهدارنده نمونه، نمونه و سیم (نیکل- کروم) جهت اشتعال [۸]

سرعت اشتعال پایدار (قانون وایلی<sup>۱</sup>) برای سوخت‌های دسته اول و دوم در جدول (۶) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده، سوخت (P-06) دارای کمترین سرعت اشتعال پایدار است که به علت وجود میکرو ذرات آلومینیم ۵۰ میکرومتری (AI-06) می‌باشد و سوخت (P-01a) در مقایسه با سایر ترکیبات، در

جدول ۶- سرعت اشتعال پایدار سوخت‌های دسته اول و دوم در محدوده فشاری ۷۰-۱ بار [۵]

سرعت اشتعال در فشار ۷۰ بار (mm.s <sup>-1</sup> )	قانون سرعت اشتعال وایلی، $r_b^* = ap^n$ (mm.s <sup>-1</sup> )		نوع سوخت
	n	a(mm.s <sup>-2</sup> , Pa <sup>-n</sup> )	
۱۲/۱۶	۰/۳۸±۰/۰۱	۲/۴۲±۰/۰۷	(P-01a)
۷/۰۳	۰/۳۷±۰/۰۱	۱/۴۶±۰/۰۶	(P-03d)
۶/۹۲	۰/۳۹±۰/۰۱	۱/۳۲±۰/۰۳	(P-05)
۶/۴۳	۰/۴۲±۰/۰۱	۱/۰۸±۰/۰۳	(P-06)
۹/۰۲	۰/۳۵±۰/۰۱	۲/۰۴±۰/۰۷	(P-07-B01a)
۸/۲۳	۰/۴۴±۰/۰۳	۱/۲۷±۰/۱۰	(P-07-B03d)



شکل ۷- مقایسه سرعت اشتعال سوخت‌های دسته اول و دوم

#### ۶- اثرات کهنگی سوخت‌ها

همان‌طور که ذکر شد سوخت‌های دسته سوم به منظور بررسی اثرات کهنگی، بر روی سرعت اشتعال مورد بررسی قرار گرفتند. با مطالعه سه فرمولبندی کاملاً یکسان که تنها از لحاظ سال تولید با هم متفاوت بودند مشاهده شد که با جایگزینی نانو ذرات مذکور با میکرو ذرات، نمونه تولید سال ۱۹۹۹ (AI-02 c) به نسبت تولیدات سال‌های ۲۰۰۲ (AI-02 b) و ۲۰۰۳ (AI-02 a) منجر به افزایش سرعت کمتری می‌شود [۱۰ و ۱۱] که دلیل این امر را می‌توان به این صورت توضیح داد که با گذر زمان، اکسید پوشش‌دهنده در اثر واکنش  $Al_2O_3$  و  $Al(OH)_3$  با بخار آب موجود، مصرف شده و بر رطوبت پذیری ساختار افزوده می‌گردد. در نتیجه این امر، نسبت  $O/Al_{OX}$  افزایش یافته و سطح مخصوص کاهش می‌یابد و بنابراین میزان توانایی نانو ذرات در افزایش سرعت اشتعال کاهش خواهد یافت.

#### ۷- مطالعات عددی

به توجه به گسترش فعالیت‌های اکتشافی اقتصادی و تحقیقاتی در فضا انتظار می‌رود که در دهه‌های آینده سوخت‌های جامد مؤثر به

یکی از نیازهای اساسی آینده تبدیل شود. مطالعه بر روی مکانیزم احتراق سوخت‌های جامد موشک و راکت‌ها به‌طور پیوسته مورد توجه بوده است. بدلیل نیاز به بهبود عملکرد موتورهای راکت سوخت جامد، افزایش ایمنی و کاهش انتشار مواد آلاینده مضر، توسعه مدلی که مشخصات احتراق را به صورت نظری پیش‌بینی کند به شکل وافر مورد نظر طراحان سوخت‌های جامد راکت و موشک در طراحی و ساخت سیستم‌های پایدار و پرنرژی بوده است. البته احتراق مواد پرنرژی جامد که یک فرایند چند مرحله‌ای پیچیده بر اساس تغییرات شیمیایی در فاز کندانس شده و فاز گازی شعله می‌باشد، یک مشکل به شمار می‌رود. فابیکنال و همکاران [۱۱] مواد جامد پرنرژی را که در احتراق بکار می‌روند مدل‌سازی نموده و به نتایج جالب توجهی از مدل‌سازی فیزیکی دست یافته‌اند. البته مدل استفاده شده به دلیل سادگی زیاد و یک بعدی در نظر گرفتن عملکرد شعله نیاز به داده‌های عملیاتی و تجربی زیادی به منظور محاسبه شدت احتراق مواد پیشران دارد.

گراس و بکست [۱۲] با در نظر گرفتن یک شعله دو بعدی نفوذی، اشتعال سوخت‌های جامد چندسازه حاوی ۸۶% AP و ۱۴% HTPB را به صورت تابعی از ابعاد ذرات AP پیش‌بینی نمودند. با توجه به

1. Hydroxy- Terminated-PolyButadien

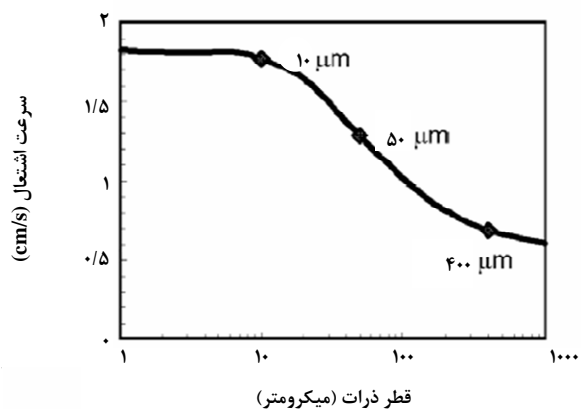
را به صورت نظری مطالعه و بررسی نموده است. فرمولبندی بسیار جدیدتر و جذابتر اکسیدکننده‌های پراثرژی را قادر خواهد ساخت تا مواد زاید اسیدی بسیار ناچیز یا در حد صفر را انتشار دهند. اصلاح فرمولبندی مواد نانو افزودنی موجود طی چندین مرحله قابل حصول خواهد بود. برای تعیین دقیق فرمولبندی مواد نانو افزودنی، لازم است نتایج حاصل از مطالعات تجربی و نظری و شبیه‌سازی‌های مختلف به صورت ترم‌هایی از فرایند (شامل مواد خام)، تجهیزات، هزینه و عملکرد تولید در کنار هم مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرند.

### ۸- نتیجه‌گیری

خصوصیات پرتابه‌ای سوخت‌های مورد مطالعه، همراه با بررسی سرعت اشتعال پایدار سوخت‌ها نشان داد که عملکرد نانو ذرات آلومینیم تا چه میزان از میکرو ذرات آن بهتر است. این افزایش سرعت از طریق آزاد شدن انرژی در اثر اکسایش نانو ذرات آلومینیمی که در مجاورت سطح قرار دارند صورت می‌گیرد. از سوی دیگر احتراق نانو ذرات آلومینیم در مقایسه با میکرو ذرات آلومینیم، نور بیشتری را در سطح اشتعال پدید می‌آورد که این پدیده به علت واکنش‌پذیری بالای نانو ذرات به دلیل بالا بودن سطح ویژه آنها می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی سوخت‌های مورد بررسی نشان داد که با جایگزینی نانو ذرات با میکرو ذرات، احتراق شدیدی در نزدیکی سطح صورت می‌گیرد که حتی می‌توان تا دو برابر، سرعت اشتعال را افزایش داد. این در حالیست که چگالی سوخت نیز افزایش می‌یابد. همچنین اثرات کهنگی سوخت‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت.

ویژگی ذرات آلومینیم، به روش‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) و BET (برای محاسبه سطح مخصوص) بررسی شد. به کارگیری نانو ذرات آلومینیم در سوخت جامد موشک، هنوز دارای نقاط ضعفی همچون خطر جابجایی ذرات، اثرات کهنگی در مدت ذخیره شدن، کم کردن اندازه محصولات احتراق و تضعیف امواج صوتی می‌باشد که برخی از این نقایص را می‌توان با پوشش دادن این نانو ذرات رفع نمود. البته تا رسیدن به سوخت‌های جامد مؤثر با کاربرد نانو فناوری برای استفاده در موتور موشک و راکت‌ها جهت کاربردهای فضایی، مطالعات تجربی و نظری بسیاری مورد نیاز است.

شکل (۸) سه ناحیه متفاوت احتراق شامل: ناحیه مونوپروپیلنت AP، ناحیه شعله نفوذی HTPB و ناحیه پیش‌آمیخته با کاهش ابعاد ذرات AP قابل مشاهده است و ساختار مدل شعله به صورت قابل توجهی با تغییرات ابعاد ذرات تغییر می‌کند. نتایج حاصل به صورت کیفی شبیه نتایج مدل BDP<sup>۱</sup> بود [۱۳] البته در محدوده پیش‌آمیخته ابعاد ذرات AP تأثیری بر شدت سوختن نداشت. ناحیه پیش‌آمیخته در ابعاد ۱۰ میکرومتر قابل حصول بوده و ماکزیمم سرعت اشتعال قابل حصول توسط پیشران‌های جامد می‌باشد. مدل BDP در سال ۱۹۷۰ توسعه یافته و در آن زمان به صورت نظری برای احتراق گونه‌های چندسازه AP قابل قبول بوده است [۱۳].



شکل ۸- تغییرات سرعت سوختن بر حسب ابعاد ذرات AP در فشار ۲۰ اتمسفر برای چندسازه AP ۸۶٪ و HTPB ۱۴٪ [۱۲]

ماگی و همکاران [۱۴] طی مطالعاتی، مدلی بر اساس خواص ناهمگنی که توانایی توصیف تمایل به تجمع نانو ذرات برای فرمولبندی افزودنی‌های نانوآلومینیمی استاندارد را دارد ارائه نموده‌اند. به طوریکه با داشتن فرمولبندی واقعی و چگالی نانو افزودنی‌ها بسته به گدی که بیانگر خواص نانو افزودنی و آنالیز آنهاست مشخص می‌گردد که پیش‌بینی تجمع و به هم چسبندگی نانو ذرات به طور موفقیت آمیزی با داده‌های تجربی در فشار ۵ بار برای چهار فرمولبندی مختلف قابل رقابت است. آندرو [۱۵] نتایج اضافی در ارتباط با افزودنی‌ها با پوشش‌های پراثرژی جهت کاربردهای میان مدت نظیر: بهینه‌سازی خواص مکانیکی و مطالعات اقتصادی مواد خام که برای واحدهای صنعتی در دسترس می‌باشند

1. Beckstead-Derr-Pricy



- [1] Djeugoue A., Prakash M., Kevan L., "Catalytic Study of Methanol to Olefins Conversion in Four Small-Pore Silicoaluminophosphate Molecular Sieves", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 104, pp 6452-6461, (2000).
- [1] Meda, L., Marra, G., Galfetti, L., Severini, F., De Luca, L., "Nano-aluminum as energetic material for rocket propellants", *Materials Science and Engineering, C* 27, pp. 1393–1396, (2007).
- [2] Jayaraman, K., Anand, K.V., Chakravarthy, S.R., Sarathi, R., "Effect of nano-aluminium in plateau-burning and catalyzed composite solid propellant combustion", *Combustion and Flame* 156, pp.1662-1673, (2009).
- [3] Kwon, Y.S., Gromov, A.A., Ilyin, A.P., Rim, G.H., "Passivation process for superfine aluminum powders obtained by electrical explosion of wires", *Applied Surface Science* 211, pp.57-67, (2003).
- [4] Escot Bocanegra, P., Chauveau, C., Gökalp, I., "Experimental studies on the burning of coated and uncoated micro and nano-sized aluminium particles", *Aerospace Science and Technology* 11, pp.33-38, (2007).
- [5] Galfetti, L., De Luca, L.T., Severini, F., Colombo, G., Meda, L., Marra, G., "Pre and post-burning analysis of nano-aluminized solid rocket propellants", *Aerospace Science and Technology* 11, pp.26-32, (2007).
- [6] Vander Heijden, A.E.D.M., Creighton, Y.L.M., vander Peppel, R.J.E., Abadjieva, E., "Modification and characterization of (energetic) nanomaterials", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Article in press
- [7] Roger E. Lo, "A novel kind of solid rocket propellant", *Aerospace Science and Technology*, no. 6, pp. 359-367, (1998).
- [8] Ulrich Teipel, *Energetic Materials: Particle Processing and Characterization*, First edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 200-300, (2005).
- [9] Meda, L., Marra, G., Galfetti, L., Inchingalo, S., Severini, F., De Luca, L., "Nano-composites for rocket solid propellants", *Composites Science and Technology* 65, pp.769-773, (2005).
- [10] Olivani, A., Galfetti, L., Severini, F., Colombo, G., Cozzi, F., Lesma, F., Sgobba, M., "Aluminum particle size influence on ignition and combustion of AP/HTPB/Al solid rocket propellants", in: *RTO Specialist's Meeting on Advances in Rocket Propellant Performance, Life and Disposal for Improved System Performance and Reduced Costs*, Applied Vehicle Technology Panel (AVT), alborg, Denmark, pp.23–26, (2002).
- [11] Y. Fabignon, J.F. Trubert, V. Boriae, V. Giovangigli, A. Bizot, N. Meynet, "Some aspects of combustion modeling for solid energetic materials", *Aerospace Science and Technology*, 11, pp. 5–12, (2007).
- [12] Matthew L. Gross, Merrill W. Beckstead, "Diffusion flame calculations for composite propellants predicting particle-size effects", *Combustion and Flame*, Article in press.
- [13] M.W. Beckstead, "Combustion calculation for composite solid propellants", in *13th JANAF Combustion Meeting* CPIA No. 281, PP. 299-312, (1976).
- [14] Filippo Maggi, Alessio Bandera, Luciano Galfetti, Luigi T. DeLuca, Thomas L. Jackson, "Efficient solid rocket propulsion for access to space ", *Acta Astronautica*, Article in press.
- [15] Bruno D'Andrea, Francesca Lillo, Alain Faure, Christian Pet-m, "A new generation of solid propellants for space launchers", *Acta Astronautica* Vol. 47, Nos. 2-9, pp. 103-112, (2000).